

Impacto potencial del riego con agua subterránea sobre los suelos en la cuenca del arroyo Pergamino, Provincia de Buenos Aires, Argentina

BEATRIZ N LOSINNO^{1,✉}, OLGA S HEREDIA¹, CLAUDIA M SAINATO¹,
LIDIA GIUFFRÉ¹ & GRISELDA GALINDO²

¹ *Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA*

² *Cátedra de Hidrogeología, Fac. de Ciencias Exactas y Naturales, Univ. de Buenos Aires, ARGENTINA*

RESUMEN. El análisis del impacto potencial que el agua subterránea puede tener sobre la salinización y sodificación de suelos está basado en el conocimiento en forma conjunta de las características del agua y de los suelos. El objetivo de este trabajo es conocer la influencia del acuífero freático sobre la conductividad eléctrica del suelo, así como la distribución espacial de las propiedades del suelo y del agua subterránea relacionadas con la salinización y sodificación, a fin de determinar las situaciones actuales de riesgo por aplicación de riego complementario. Se realizó un muestreo de suelos y aguas analizando las propiedades mediante métodos geostatísticos a fin de contemplar la variabilidad espacial de las mismas. Se realizó un mapa de la distribución de la conductividad eléctrica del suelo (CE_s) por interpolación con el método de "kriging", determinándose que los valores máximos están en zonas topográficamente bajas y que, sobre la margen izquierda del arroyo Pergamino, algunos máximos en la CE_s coinciden con las áreas de alta conductividad del acuífero libre. La profundidad y conductividad eléctrica del acuífero freático presentaron una correlación moderada con la CE_s solamente en la margen izquierda. Del análisis de la conductividad eléctrica y el porcentaje de sodio intercambiable de los suelos, en conjunto con la conductividad y la relación de adsorción de sodio del agua de los pozos en explotación, respectivamente, se determinó que el 40% de los sitios muestreados evidenciaron alto riesgo de sodificación. La influencia del acuífero libre sobre los suelos no estuvo estrictamente asociada con la topografía. El impacto potencial del riego complementario sobre los suelos resultó fuertemente dependiente de la localización geográfica; los sitios con una pendiente topográfica suave tuvieron mayor riesgo de salinización y sodificación. [Palabras clave: acuíferos, calidad de agua, degradación, suelos.]

ABSTRACT. Potential impact of irrigation with groundwater on soils of Pergamino stream basin, Buenos Aires Province, Argentina: The analysis of the potential impact that complementary irrigation may have on salinization and sodification of soils is based on the knowledge of groundwater and soil background features. The objective of this work was to study the influence that electrical conductivity and depth of free groundwater may have on soil conductivity, and to perform a joint analysis of soil and water potentially used for irrigation to obtain the current situation in order to prevent soil degradation. Taking into account the spatial variability of aquifer properties shown in previous results, geostatistical methods were used to analyse the data resulting from soil and water sampling. A mapping of soil electrical conductivity was made using the kriging interpolation. Maximum values were found at the low topographic zones and some of them are in agreement with areas of high conductivity of free groundwater, at the left margin of Pergamino stream. Depth of the water table had a moderate negative geostatistical correlation with soil electrical conductivity only at the left margin, where a moderate correlation of soil and water electrical conductivity was also found. Electrical conductivity and exchangeable sodium percentage of soils were plotted against the conductivity and sodium adsorption relation of water from developing wells, respectively. A group of sites with moderate risk of salinization was determined, and 40% of the sites showed high risk of sodification. The influence of free groundwater on soils was not strictly associated with topography. The potential impact of complementary irrigation on soils was strongly dependent on the geographic location, and sites with a gentle topographical slope had higher risk of salinization and sodification. [Keywords: aquifers, degradation, soil, water quality.]

✉ Cátedra de Física, Facultad de Agronomía; Univ. de Buenos Aires; Av. San Martín 4453; 1417DSQ Buenos Aires; ARGENTINA. bnlosinno@arnet.com.ar

Recibido: 10 octubre 2001; Revisado: 26 febrero 2002
Aceptado: 1 marzo 2002

INTRODUCCIÓN

En el norte de la provincia de Buenos Aires (aproximadamente entre 33°40'–34°20'S y 60°–61°O), la ocurrencia periódica de sequías de diferente intensidad es una de las principales causas de la variabilidad interanual en los rendimientos de los cultivos. Por ello el riego complementario es una práctica útil para compensar la producción de la zona. Sin embargo, resulta indispensable evaluar los posibles impactos negativos que puede causar el uso del riego complementario sobre los suelos, debido, entre otros efectos, a la salinización y a la sodificación, las cuales están relacionadas con la conductividad eléctrica y con la relación de adsorción de sodio del agua, respectivamente.

Varios autores analizaron tanto las características del agua subterránea de esta zona como los efectos de la aplicación de riego sobre las propiedades físico-químicas del suelo. Entre estos trabajos se pueden citar a Santa Cruz (1994) y Santa Cruz & Silva Busso (1995), quienes realizaron sondeos geoelectrónicos y análisis químicos del agua subterránea de una amplia zona de la Pampa Ondulada, encontrando, por debajo de la zona no saturada, al acuífero Pampeano que incluye en su parte superior el acuífero libre o freático y, a mayor profundidad, niveles permeables de carácter semiconfinado, siendo el agua del tipo bicarbonatada sódica. En la zona de estudio (Figura 1) el nivel freático se encontró a menos de 3 m de profundidad hacia el oeste de los 60°45'O y a más de 3 m en las cercanías de la ciudad de Pergamino. Por debajo se encuentran las arenas Puelches a profundidades de 50–100 m en la zona de Pergamino, las cuales presentan alta salinidad. En la zona de la cuenca del arroyo Pergamino, Sainato et al. (1997) obtuvieron, mediante estudios geofísicos, profundidades del nivel freático de 2–8 m, y espesores del acuífero Pampeano variables según el sitio (Sainato et al. 2000a). El acuífero libre se utiliza para consumo humano y animal, y la interfase entre el agua dulce y el agua salada se halla a diferente profundidad en ambos márgenes del arroyo Pergamino.

En cuanto a los efectos que el agua puede ejercer sobre el suelo, es importante evaluar fundamentalmente la conductividad eléctrica y los valores de porcentaje de sodio intercam-

biante del suelo, asociados a procesos de salinización y sodificación, respectivamente. Peinemann et al. (1998) estudiaron los efectos físicos de la aplicación de aguas con elevada proporción de sales sódicas; éstas producen una dispersión de los coloides del suelo deteriorando las condiciones hidráulicas de los mismos. El aspecto más delicado sería la elevada proporción de sodio en relación a los cationes bivalentes de este agua (Cerana 1980). Peinemann et al. (1998) concluyeron que el riego con aguas subterráneas disminuyó la conductividad hidráulica e incrementó el pH y el porcentaje de sodio intercambiable del suelo. Andriulo et al. (1998) encontraron, tras 11 años de riego complementario, efectos negativos sobre las propiedades del suelo. Heredia & Conti (datos no publ.) determinaron que es importante evaluar y estimar la evolución de las variables edáficas con el fin de prevenir el deterioro del suelo.

Existen numerosos sistemas de diagnóstico y pronóstico de los efectos del uso de agua de baja calidad para riego. En la zona de estudio, donde el riego es complementario, las recomendaciones que mejor se adaptan para evaluar la aptitud del agua son las realizadas sobre las condiciones edafo-climáticas locales, tal como lo describe el INTA (1999) para la zona norte de la provincia de Buenos Aires.

Sainato et al. (2000b) obtuvieron la distribución de la conductividad eléctrica del acuífero freático (CE_f), encontrándose sus máximos sobre la margen izquierda del arroyo Pergamino coincidentes con zonas deprimidas del terreno. Similares resultados obtuvieron Pepi et al. (1998) en el noroeste de la provincia, donde los suelos de las zonas deprimidas con mayor contenido de partículas finas presentaron mayor CE_f . El aumento de la conductividad eléctrica del suelo en las zonas deprimidas se atribuye al efecto del agua freática o ascenso capilar de soluciones salinas y la precipitación de sales en períodos de déficit hídricos. Así como en la distribución de la CE_f existen máximos y mínimos zonales (Sainato et al. 2000b), se podría encontrar un patrón similar para la distribución de la conductividad eléctrica del suelo que podría estar asociado con la topografía.

El primer objetivo del trabajo es analizar la distribución de la conductividad eléctrica del suelo en la zona y su relación con la topogra-

fía del terreno, así como investigar la influencia de las características del acuífero freático, la conductividad y la profundidad sobre la conductividad del suelo. En general, en los acuíferos más profundos potencialmente utilizables para riego las zonas de descarga de los acuíferos presentan calidad de agua inferior a las zonas de recarga (Custodio & Llamas 1983), como ocurre en otras regiones del país (Galindo et al. 2001). Además, las zonas deprimidas tienen suelos con deficiencia de drenaje (INTA 1972), lo cual intensificaría el efecto negativo del agua de riego de baja calidad, que se debería considerar como riesgosa.

El segundo objetivo de este trabajo es analizar, en la zona de la cuenca del arroyo Pergamino, la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio del agua subterránea potencialmente utilizable para riego, en forma conjunta con las propiedades del suelo relacionadas con la salinidad y sodicidad, a fin de determinar posibles zonas de riesgo para la aplicación del riego complementario.

MÉTODOS

Área de estudio

En la Figura 1 se presenta un mapa de la zona de estudio con la ubicación de los sitios de sondeos eléctricos verticales (SEV) realizados por Sainato et al. (1997, 2000a) para estudiar la morfología de los acuíferos. También se señalan los lugares de muestreo de suelos llevados a cabo en este trabajo.

Los suelos muestreados correspondieron principalmente a Argiudoles típicos de las Series Pergamino, Rojas y Juncal y Argialbol aérico de la Serie Las Gamas y Argiudol ácuico de la Serie El Arbolito y el complejo del Arroyo Sin Nombre de suelos alcalino-sódicos (INTA 1972). Los suelos de la región se han desarrollado sobre materiales loésicos de distinta granulometría según el área de deposición, siendo en general más gruesos sobre la margen derecha del arroyo Pergamino, donde domina la Serie Rojas con suelos de mejores características físicas que sobre la margen

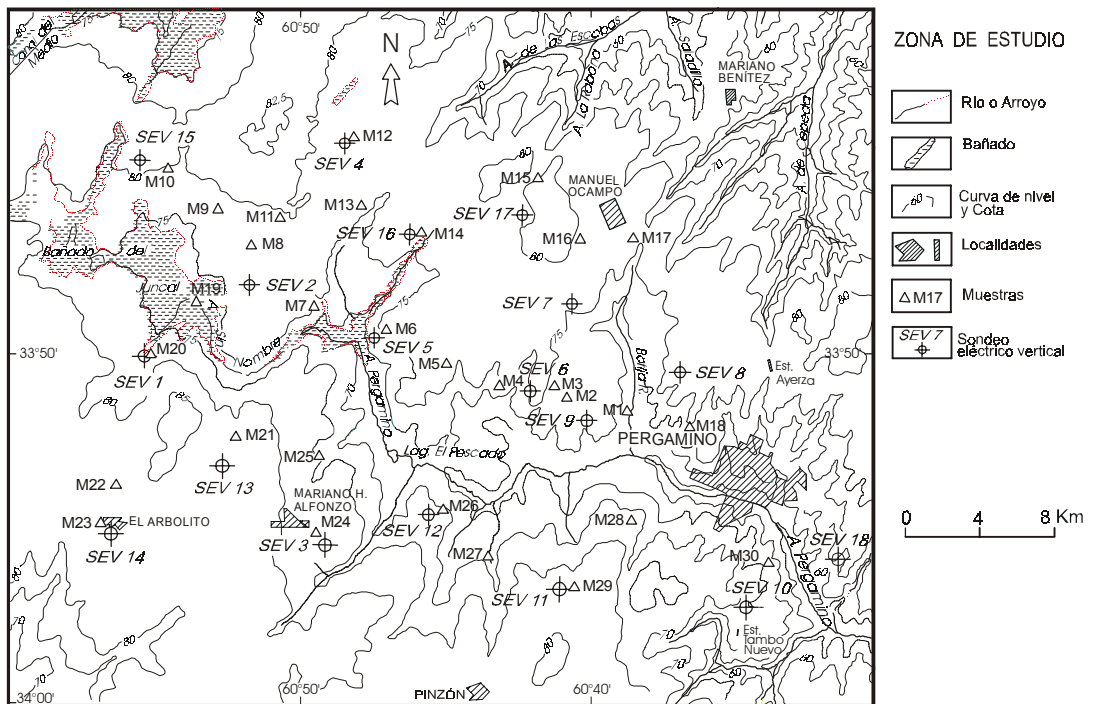


Figura 1. Zona de estudio en la cuenca del arroyo Pergamino, Provincia de Buenos Aires. Se muestra la ubicación de los sitios de sondeos (SEV 1 al 17) y de muestreo de suelos (M 1 al 30). Se indican las curvas de nivel topográfico. El drenaje principal es en dirección NO-SE.

Figure 1. Study zone in the Pergamino stream basin, Buenos Aires Province. Locations of sites of soundings (SEV 1 to 17) and soil sampling (M 1 to 30) are shown. Topographic level contours are indicated. The main drainage is in the NW-SE direction.

izquierda, donde prevalecen los suelos de la Serie Pergamino. Por otra parte, en el área de influencia de bañados y arroyos los suelos se desarrollaron a partir de aluviones con una fuerte influencia de condiciones hidrohalmórficas. El uso de la tierra es principalmente agrícola con predominio de producción de soja y maíz y, en menor proporción, la cobertura de pasturas implantadas.

Muestreo y análisis de suelos

El muestreo fue de tipo direccionado y se tomaron 30 muestras compuestas de tres submuestras en diferentes profundidades entre 0 cm y 10 cm (Figura 1). Las muestras se secaron al aire, fueron molidas en mortero y tamizadas con tamices de 0.5 mm y 2 mm para realizar los análisis químicos correspondientes. Las determinaciones realizadas fueron: pH en agua (relación 1:2.5), carbono orgánico (Walkley-Black), fósforo extractable (Kurtz y Bray nº1), conductividad eléctrica en pasta saturada (CE_s), cationes intercambiables y Capacidad de Intercambio Catiónico (método del acetato de amonio 1N pH 7), calculándose, además, el porcentaje de sodio intercambiable (Page 1982).

Muestreo y análisis del agua del acuífero pampeano

Se realizó un censo de las perforaciones existentes en la zona cercanas a los sitios de sondeos SEV y se tomaron 14 muestras de agua (profundidad 25-30 m). Se midió su conductividad eléctrica (determinación potenciométrica: CE_p) y se analizó su contenido de sodio, potasio, calcio y magnesio por espectrofotometría de absorción atómica (AOAC 1995).

Análisis geoestadístico

Dado que tanto las propiedades edáficas como las del agua subterránea poseen una marcada variabilidad espacial, se analizaron los datos mediante métodos geoestadísticos. Para estudiar la distribución espacial de la conductividad eléctrica del suelo en la cuenca del arroyo Pergamino, se realizó una interpolación llamada "kriging", que brinda información donde no hay datos disponibles (Trangmar et al. 1985) y permite construir un mapa de isolíneas de esta propiedad. Esta interpolación geoestadística estima los valores desconocidos dentro de una red conside-

rando la correlación espacial de los valores obtenidos en las mediciones. En el proceso de "kriging", el valor de cada punto de la red es estimado como una combinación lineal de datos en puntos vecinos. Las ponderaciones de los datos se calculan resolviendo un sistema de ecuaciones lineales, minimizando la estimación de la varianza con estimadores insesgados. De este modo se construyó un mapa con la distribución de CE_s en la zona de estudio. Se procedió de igual forma con los datos de profundidad del nivel freático obtenido de los SEV realizados por Sainato et al. (2000a), obteniéndose un mapa de isolíneas de nivel freático.

Se estudió la relación entre la CE_s , la CE_f y la profundidad del acuífero. En el caso de la CE_f se trata de un valor promedio para la zona saturada.

Como los lugares de sondeos no coinciden exactamente con los sitios de muestreo de suelo, se efectuó un cálculo geoestadístico de las correlaciones. En el cálculo de correlación, el programa Geostat (1996) estimó la distancia máxima o rango al que se puede encontrar un sondeo SEV con los valores de las propiedades freáticas requeridas para asociarle a cada muestra de suelo. El ajuste lineal de estos datos se realizó a través de la correlación normalizada α entre las dos variables:

$$\alpha = \frac{Cov(CE_s; X)}{(CovCE_s CovX)^{1/2}},$$

donde X es la conductividad eléctrica o la profundidad de la capa freática, según el caso, obtenida de los SEV, y Cov es la covarianza.

Posteriormente se graficaron los valores de CE_p del agua de las perforaciones de la zona que explotan el Pampeano, en función de la CE_s . La asociación entre sitios de muestreo de suelos y perforación se realizó teniendo en cuenta el rango de correlación. Se determinaron sitios con distinto grado de riesgo de salinización del suelo. De igual modo se graficó la relación de la adsorción de sodio del agua de las perforaciones y el porcentaje de sodio intercambiable del suelo, para analizar los riesgos de sodificación. Para tener en cuenta las condiciones locales de la Pampa Húmeda, donde el riego es complementario, se utilizaron las recomendaciones del INTA (1999) para suelos Argiudoles, con contenido de materia orgánica de 2.5-3%, contenido de

Tabla 1. Características promedio (y CV en porcentaje, entre paréntesis) de los suelos evaluados en la cuenca del arroyo Pergamino, Provincia de Buenos Aires. CE_s : conductividad eléctrica en pasta saturada; CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico.

Table 1. Mean (and CV in percentage, between brackets) characteristics of evaluated soils in the Pergamino stream basin, Buenos Aires Province. CE_s : soil electrical conductivity; CIC: Cation Exchange Capacity.

Variables	Promedio (CV)
pH en agua	6.48 (9)
Carbono oxidable (%)	1.81 (20.83)
Fósforo extractable ($\mu\text{g/g}$)	30.94 (69.41)
CE_s ($\mu\text{S/cm}$)	427 (218)
Calcio intercambiable (cmolc/kg)	10.8 (18.43)
Magnesio intercambiable (cmolc/kg)	2.68 (25.9)
Sodio intercambiable (cmolc/kg)	0.73 (186.37)
Potasio (cmolc/kg)	1.6 (18.21)
CIC (cmolc/kg)	18.27 (8.78)

arcilla de 22–24% en el horizonte A y con una lámina promedio de riego de 150–200 mm por año. Estas recomendaciones indican que las aguas son seguras para riego complementario y cultivos extensivos (consideradas aptas) cuando la CE_p es menor a 2000 $\mu\text{S/cm}$, son de aptitud dudosa cuando CE_p está entre 2000 y 4000 $\mu\text{S/cm}$ y no son aptas con CE_p mayor a 4000 $\mu\text{S/cm}$. En cuanto al riesgo de sodificación, las aguas son aceptables cuando el valor de la relación de adsorción de sodio es menor de 10, de calidad dudosa cuando está entre 10 y 15 y riesgosas para valores mayores a 15.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se presentan los valores promedio y los coeficientes de variación de las propiedades edáficas analizadas en los muestreos. Estos suelos son ligeramente ácidos, con moderado contenido de materia orgánica, no salinos. Tienen altos coeficientes de variación para fósforo, sodio y CE_s . Estos suelos presentaron una saturación cálcica baja (57%) y de bases del 82.2%

La CE_s estuvo correlacionada de manera positiva y altamente significativa con los iones más importantes que saturan el complejo de intercambio (sodio y calcio), no así con la Capacidad de Intercambio Catiónico (Tabla 2). También se observó que el pH estuvo fuertemente asociado al sodio.

Tabla 2. Valores del coeficiente de correlación entre algunos parámetros de los suelos evaluados en la cuenca del arroyo Pergamino, Provincia de Buenos Aires. CE_s : conductividad eléctrica en pasta saturada; CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$; ns: no significativo; $n = 31$.

Table 2. Values of the correlation coefficient between some parameters of evaluated soils in the Pergamino stream basin, Buenos Aires Province. CE_s : soil electrical conductivity; CIC: Cation Exchange Capacity. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$; ns: not significant; $n = 31$.

	CE_s	Sodio	pH	Calcio
Sodio	0.7192 ***			
pH	0.441 *	0.8128 ***		
Calcio	0.5195 **	0.3112 ns	0.288 ns	
CIC	-0.2154 ns	0.1479 ns	0.279 ns	0.8349 ***

La distribución de la CE_s presentó valores que variaban entre 130 y 660 $\mu\text{S/cm}$ (Figura 2a). Las isolíneas del nivel freático respecto al nivel del mar (Figura 2b) indican un gradiente hidráulico en la dirección y sentido dado por las flechas (dirección de flujo). Las zonas de recarga coinciden con altos topográficos y la zona principal de descarga es hacia el cauce del arroyo, coincidente con los bajos.

La correlación geoestadística entre CE_s y CE_f resultó muy baja (0.24) cuando se incluyeron todos los resultados disponibles, lo que sugiere que hay poca influencia de la conductividad del agua freática sobre la del suelo en la zona de estudio. Se encontró mayor correlación (0.59) cuando solo se incluyeron las muestras situadas sobre la margen izquierda del arroyo Pergamino, hacia el norte, indicando un aumento de la CE_s con el incremento de la CE_f (Figura 3) que, siendo un valor promedio, no descarta la presencia de otros factores modificadores en la zona no saturada.

El coeficiente de correlación espacial entre la CE_s y la profundidad de la capa freática fue de -0.13. Al considerar solo los sitios sobre la margen izquierda del arroyo Pergamino, la correlación aumentó a -0.54 (Figura 4). Estos resultados indican un aumento de la CE_s en la medida en que el nivel freático es más superficial.

La Figura 5 muestra la correlación entre la CE_p y la CE_s , delimitando sitios aptos, dudo-

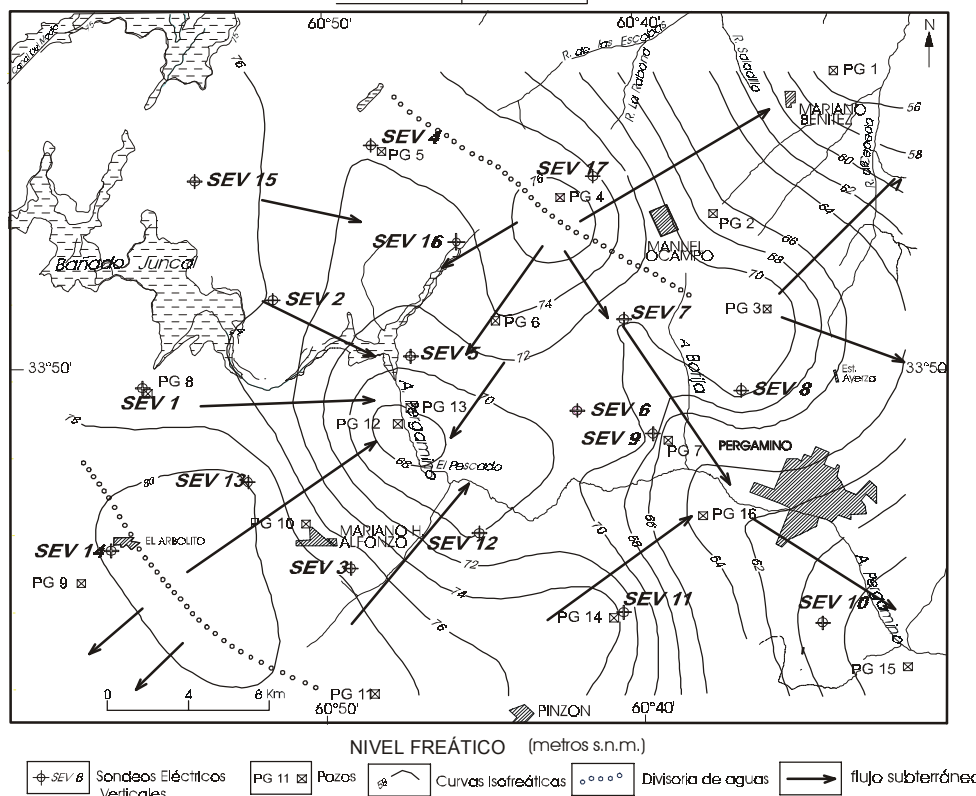
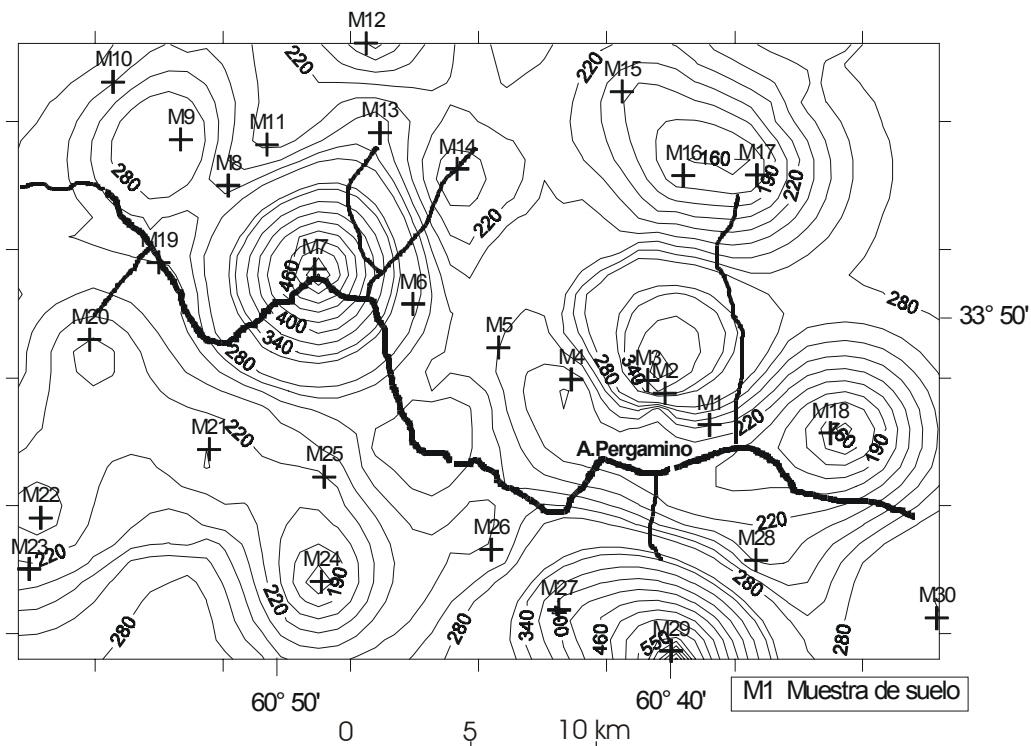


Figura 2. (a) Isolíneas de conductividad eléctrica del suelo (en $\mu\text{S}/\text{cm}$) en la cuenca del arroyo Pergamino, Provincia de Buenos Aires. (b) Isolíneas de nivel freático (en m.s.n.m.), en base a una recopilación de los sondeos realizados por Sainato et al. (1997); se muestra la divisoria de aguas y el sentido de flujo subterráneo.

Figure 2. (a) Isolines of soil electrical conductivity (in $\mu\text{S}/\text{cm}$) in the Pergamino stream basin, Buenos Aires Province. (b) Isolines of phreatic level (in m.a.s.l.) based on the compilation of the soundings carried out by Sainato et al. (1997); ground-water parting and flow sense are shown.

sos o seguros respecto al problema de la salinización del suelo. En la Figura 6 se observa la correlación entre la relación de adsorción de sodio del agua y el porcentaje de sodio intercambiable del suelo, indicando sitios riesgosos, dudosos o aceptables respecto al impacto en la sodificación del suelo.

DISCUSIÓN

Las propiedades promedio del suelo resultaron dentro de los valores típicos para esta zona. El alto coeficiente de variación en el fósforo podría explicarse por el empleo de fertilizantes, variable según el uso de la tierra. La variabilidad del sodio y de la CE_s está asociada a diferentes condiciones topográficas; ambas propiedades aumentan significativamente en las zonas bajas del paisaje. El pH estuvo fuertemente relacionado con el sodio, aumentando ambos también en zonas deprimidas.

En la Figura 2a se visualizan las tres zonas de conductividad del suelo relativamente más alta (por encima de $350 \mu\text{S}/\text{cm}$), sin llegar a ser suelos salinos. Una está en el área baja de bañados (ver Figura 1), coincidente con la descarga freática que se interpreta en el mapa de isolíneas de nivel freático de la Figura 2b. Las dos restantes se encuentran en las cercanías de las M3 y M29, sitios que no corresponden a

bajos del terreno. Los máximos en la CE_f obtenidos por Sainato et al. (2000b) y los máximos de CE_s de la Figura 2a, sobre margen izquierda, se ubican aproximadamente en los mismos sitios: la zona deprimida de los bañados y las cercanías a la muestra M3. Sobre la margen derecha no se evidenció tal coincidencia.

La relación entre CE_s y CE_f o su profundidad presentó correlación significativa sobre la margen izquierda exclusivamente. Podría considerarse otro factor en juego, la profundidad del techo del acuífero, pero donde se la encuentre más allá de los 2–3 m de la superficie, su influencia sería despreciable, y esos sitios no contribuyen a la correlación. Las diferencias entre las márgenes del arroyo en las correlaciones entre la CE_s y CE_f o la profundidad del acuífero podrían atribuirse a diferencias texturales de las series dominantes. Los suelos sobre la margen izquierda son más finos, lo cual favorecería el ascenso capilar del agua freática.

La mayoría de los sitios que según las recomendaciones del INTA (1999) presentan aguas no aptas o dudosas para el riego por su riesgo de salinización se encuentran en la margen izquierda (M 6, 7, 8, 11, 12, 13 y 14; Figura 5). El 70% de las muestras evaluadas presentaban poco riesgo de salinización, dichas muestras procedían tanto de la margen izquierda

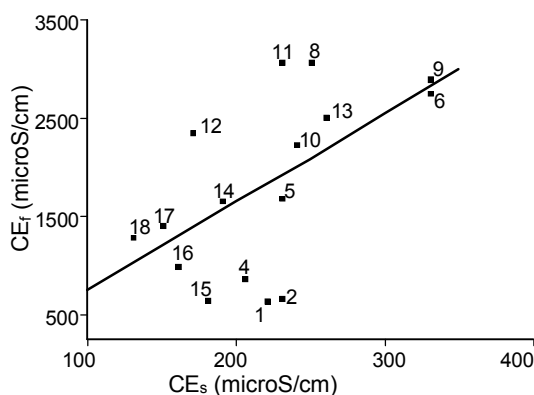


Figura 3. Correlación cruzada entre la conductividad eléctrica del agua del acuífero freático (CE_f) y la conductividad del suelo (CE_s) sobre la margen izquierda del arroyo Pergamino, Provincia de Buenos Aires.

Figure 3. Cross-correlation between electrical conductivity of the phreatic aquifer (CE_f) and soil electrical conductivity (CE_s) on the left margin of Pergamino stream, Buenos Aires Province.

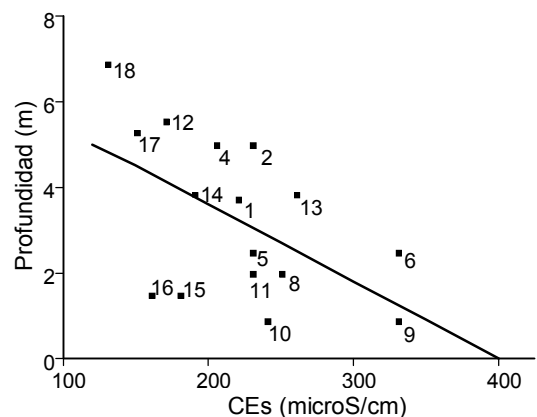


Figura 4. Correlación cruzada entre la profundidad del nivel freático y la conductividad del suelo (CE_s) sobre la margen izquierda del arroyo Pergamino, Provincia de Buenos Aires.

Figure 4. Cross-correlation between depth of water table and soil electrical conductivity (CE_s) on the left margin of Pergamino stream, Buenos Aires Province.

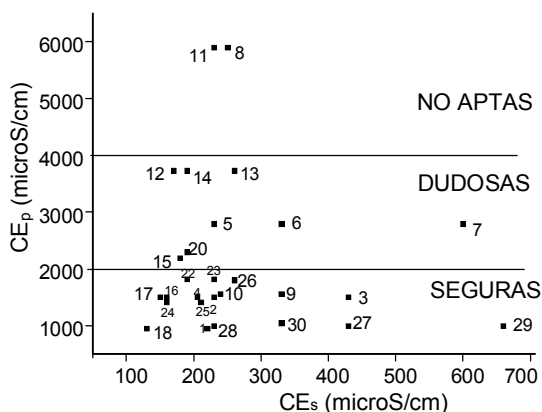


Figura 5. Correlación geoestadística entre la conductividad eléctrica del agua de las perforaciones (CE_p) y la conductividad del suelo (CE_s) en la cuenca del arroyo Pergamino, Provincia de Buenos Aires. Se clasifican las aguas en seguras, dudosas y no aptas con respecto al riesgo de salinización de los suelos.

Figure 5. Geostatistical correlation between electrical conductivity of developing wells (CE_p) and soil electrical conductivity (CE_s) in the Pergamino stream basin, Buenos Aires Province. Water is classified as safe, doubtful and unsuitable with regard to the risk of soil salinization.

como de la margen derecha del arroyo. Respecto al riesgo potencial de sodificación del suelo, solo tres de los sitios muestreados (M1, M9 y M19) presentaron valores de porcentaje de sodio intercambiable del suelo por encima de un valor crítico de 7, para los cuales es irrelevante analizar la relación de adsorción de sodio del agua correspondiente dada su baja estabilidad coloidal natural. Del resto, 12 muestras de agua (que representan el 40% del total) se clasificarían como riesgosas, con valores más altos de relación de adsorción de sodio en la margen izquierda, 10 se clasificarían como dudosas y solo 2 como aceptables para riego complementario según el valor de la relación de adsorción de sodio. La zona más comprometida se encuentra hacia el noroeste, cercana a los bañados, aunque hay situaciones riesgosas en áreas más altas hacia el sudoeste. En ambos casos se trata de sitios con pendientes topográficas suaves (Figura 1). Sería necesario hacer una evaluación más exhaustiva para ver bajo qué condiciones se podría atenuar dicha situación, o determinar el momento oportuno de realizar correcciones para mejorar la estabilidad del complejo coloidal.

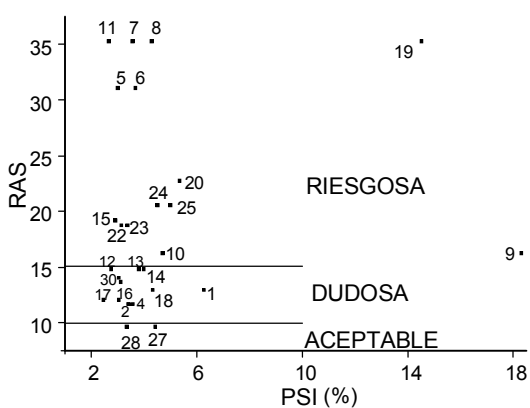


Figura 6. Correlación geoestadística entre la relación de adsorción de sodio del agua de las perforaciones (RAS) y el porcentaje de sodio intercambiable del suelo (PSI) en la cuenca del arroyo Pergamino, Provincia de Buenos Aires. Se clasifican las aguas en aceptables, dudosas y riesgosas con respecto al peligro de sodificación de los suelos.

Figure 6. Geostatistical correlation between sodium adsorption relation of water from developing wells (RAS) and the exchangeable sodium percentage of soil (PSI) in the Pergamino stream basin, Buenos Aires Province. Water is classified as acceptable, doubtful and risky with regard to soil sodification.

Dada la baja saturación cálcica de los suelos, se considera riesgosa la aplicación de aguas sódicas como lo son las de la región. Dicha aplicación podría favorecer los procesos de encostramiento y erosión. La saturación de bases es ligeramente inferior a las que presentan las principales series de suelos, que se encuentra entre 84% y 91% (INTA 1972).

CONCLUSIONES

Se puede concluir que la influencia del nivel freático en la conductividad eléctrica del suelo no se puede asociar exclusivamente a la topografía del terreno. Los sitios en que la máxima conductividad eléctrica del suelo y del agua freática coinciden se ubican en la margen izquierda del arroyo Pergamino, donde también se observó una correlación moderada entre ambas propiedades, no encontrándose dicha correlación en la margen derecha. Sobre esta última, entonces, habría escaso riesgo de salinización del suelo por ascenso capilar de la freática. Este comportamiento diferente a ambos márgenes del arroyo podría atribuirse a diferencias texturales de las series dominantes.

Las muestras de agua provenientes de las perforaciones que se utilizan para riego presentan riesgo de salinización en el 30% de los sitios y riesgo de sodificación en el 40%. Ambos riesgos predominan en el sector noroeste de la zona de estudio, aunque también se han encontrado sitios con riesgo de sodificación en zonas altas con escasa pendiente. Las curvas de nivel topográfico indican que las zonas de riesgo de salinización y sodificación pueden asociarse no solo con zonas deprimidas sino también con áreas de suave pendiente topográfica.

El impacto que puede tener el uso de agua de riego sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, así como la influencia del acuífero freático, puede depender del sitio, debido, entre otras cosas, a que los parámetros involucrados en el análisis poseen una componente de variabilidad espacial intrínseca. Con el conocimiento del estado inicial de los suelos potencialmente regables se ha logrado señalar las zonas en que el agua de los acuíferos presenta riesgo de salinización y sodificación si no se maneja el riego de forma adecuada.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue subsidiado por el Proyecto TG57 de la Programación 1998-2000 de la UBA. G Galindo es miembro del CONICET.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDRIULO, A; ML GALETTO; C FERREYRA; G CORDONE; C SASAL ET AL. 1998. Efecto de 11 años de riego complementario sobre un Argiudol típico Pampeano. *Ciencia del Suelo* 16(2):125-127.
- AOAC. 1995. *Official methods of analysis*. 16^{va} ed. AOAC International. Arlington, VA, EEUU.
- CERANA, JA. 1980. Deterioro de los suelos a consecuencia de riegos con aguas poco salinas que contienen bicarbonatos. Pp. 55-61 en: *IX Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo*. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Paraná, Argentina.
- CUSTODIO, E & MR LLAMAS. 1983. *Hidrología subterránea*. Editorial Omega. Barcelona, España.
- GALINDO, G; C POMPOSIELLO; C SAINATO; A TINEO & C FALCÓN. 2001. Hydrogeological study of the Burreyacu basin, Tucuman Province (Argentina). *J. S. Am. Earth Sci.* 14(6):641-650.
- GEOSTAT. 1996. *Geostatistical analysis of well log and seismic data*. Hampson-Russel Software Services Ltd. Calgary, Canadá.
- INTA. 1972. *Carta de suelos de la República Argentina*. Hoja 3360-32 (Pergamino). Buenos Aires, Argentina. 106 pp.
- INTA. 1999. *Recomendaciones para la utilización de aguas para riego en función de su calidad, síntesis de los trabajos realizados en las unidades del INTA-IPG*. Seminario de Capacitación. Impacto ambiental del riego complementario. Pergamino, Argentina. 87 pp.
- PAGE, E. 1982. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. ASA & SSSA, Madison, EEUU.
- PEINEMANN, N; M DÍAZ-ZORITA; MB VILLAMIL; H LUSARRETA & D GRUNEWALD. 1998. Consecuencias del riego complementario sobre propiedades edáficas en la Llanura Pampeana. *Ciencia del Suelo* 16:39-42.
- PEPI, ML; GA GROSSO & M DÍAZ-ZORITA. 1998. Contenido salino del agua freática vinculado al tamaño de partículas de los suelos del noroeste bonaerense (Argentina). *Ciencia del Suelo* 16(2):122-124.
- SAINATO, C; B LOSINNO; A LANDINI; G GALINDO & MC POMPOSIELLO. 2000a. Prospección de los acuíferos subterráneos de la zona de Pergamino-Arrecifes, Provincia de Buenos Aires, mediante sondeos geoelectrónicos. Com. IV-51 en: *Actas del XVII Congreso Argentino de la Asociación de Ciencia del Suelo*. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- SAINATO, C; MC POMPOSIELLO; G GALINDO & H MALLEVILLE. 1997. Estudio geoelectrónico aplicado a la evaluación de recursos hídricos subterráneos en la cuenca del arroyo Pergamino (Pcia. de Buenos Aires). P. 435 en: *Actas del V Congreso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica*. 1. Sociedade Brasileira de Geofísica. San Pablo, Brasil.
- SAINATO, C; MC POMPOSIELLO; A LANDINI; G GALINDO & H MALLEVILLE. 2000b. The hydrogeological sections of the Pergamino basin (Bs. As. Province, Argentina): audiomagnetotelluric and geochemical results. *Brazilian Journal of Geophysics* 18(2):187-200.
- SANTA CRUZ, J. 1994. Aspectos hidrogeológicos e interpretación de una nueva característica formacional de subyacencia del acuífero Puelches, Pcia. de Bs. As., Argentina. Pp. 261-272 en: E Bocanegra & A Rapaccini (eds). *Temas actuales de la hidrología subterránea*. CFI, UNMP. Mar del Plata, Argentina.
- SANTA CRUZ, J & A SILVA BUSSO. 1995. *Disponibilidad del agua subterránea para riego complementario en las Pcias. de Bs. As., E. Ríos, Córdoba y Santa Fe*. Programa de servicios agrícolas provinciales, Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Argentina. 55 pp.
- TRANGMAR, B; RS YOST & G UEHARA. 1985. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.* 38:45-94.